МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 539.37 DOI 10.12737/19686

Реконструкция дефектов в упругих телах сочетанием генетического алгоритма и метода конечных элементов*

А. Н. Соловьев[1], М. Ю. Шевцов[2]**
[1,2]Донской государственный технический университет, г.Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Reconstruction of defects in elastic bodies by combination of genetic algorithm and finite element method***

A. N. Solovyev[1], M. Y. Shevtsov[2]**
[1,2]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Проведено моделирование системы неразрушающего контроля дефектов в твердых телах. Рассматриваются обратные геометрические задачи теории упругости для плоской прямоугольной области по реконструкции круговых полостей и трещин, выходящих на поверхность тела. Дополнительной информацией для решения этих задач является набор первых четырех собственных резонансных частот. Решение обратных задач основано на минимизации функционала невязки между измеренной входной информацией и рассчитанной в ходе численного решения прямых задач с заданными параметрами дефектов. В качестве инструмента решения прямых задач используется метод конечных элементов, реализованный в программе FlexPDE. Минимизация функционала осуществляется с помощью генетического алгоритма (ГА), реализованного в разработанной программе GAFEMNDT. В работе описан алгоритм этой программы и настройки ГА, которые используются в численных экспериментах. Приведены результаты этих экспериментов по определению параметров дефектов (координат центра, радиуса, координат выхода трещины на поверхность и ее размер). Эти результаты показывают достаточность дополнительной информации для преодоления некорректности задачи, а также высокую эффективность предложенного алгоритма, как в точности определения параметров дефектов, так и в скорости их поиска.

Ключевые слова: генетический алгоритм, метод конечных элементов, неразрушающий контроль.

Modeling of the non-destructive testing system of defects in solids is performed. Specifically, the inverse geometric problems of the elasticity theory for a flat rectangular area on reconstructing circular cavities and cracks breaking the body surface are considered. Additional information for solving these problems is a setting of the first four natural resonance frequencies. The inverse problem solution is based on the minimization of the residual functional between the measured input source information and the data calculated during the numerical solution of direct problems with the given parameters of defects. As a tool for solving direct problems, the finite element method implemented in FlexPDE program is used. The functional minimization is carried out by using a genetic algorithm (GA) implemented in the developed GAFEMNDT program. The program algorithm and GA settings used in the numerical experiments are described. The experiments results on determining parameters of defects (coordinates of centre, radius, coordinates of surface cracking and its size) are presented. The results demonstrate adequacy of the additional information to overcome the problem ill-posedness, as well as high efficiency of the proposed algorithm both in accuracy of detecting defects parameters, and in their search speed.

Keywords: genetic algorithm, finite element method, non-destructive testing.

Введение. Неразрушающий метод контроля (НРК) — контроль свойств и характеристик объекта, при котором не должна быть нарушена пригодность объекта к использованию и эксплуатации. Способ НРК прочности заключается в том, что исследуемая конструкция или материал не подвергается механическим разрушениям, контроль осуществляется косвенно путем измерения и математического анализа физико-механических величин, отвечающих за

---

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: solovievarc@gmail.com, mesouug@gmail.com
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

прочностные свойства конструкции или материала.

Существующие методы неразрушающего контроля, такие как радиоволновой, оптический, капиллярный, тепловой, а также радиационный хорошо зарекомендовали себя и успешно используются в производстве и не только. Но с развитием техники и планомерным увеличением удельной производительности ЭВМ возникают новые возможности для проведения неразрушающего контроля. Одним из таких способов является использование эволюционных алгоритмов при распознавании измеряемой акустической информации об инспектируемом объекте. Среди этих методов наибольшее распространение в задачах дефектоскопии получили применение искусственных нейронных сетей (ИНС) и генетических алгоритмов (ГА) на этапе минимизации функционалов невязки между измеренной и рассчитанной информацией. Так применению ИНС при идентификации трещиноподобных дефектов в различных конструкциях посвящены работы [1–4] и др. Разработку и использование ГА в задачах идентификации механических свойств упругих тел и реконструкции дефектов можно найти в работах [5–8], в которых в качестве измеренной информации используются данные о вибрации тел или их резонансных частотах.

В настоящей работе показана работоспособность сочетания метода конечных элементов и генетического алгоритма для решения задач НРК, на примере определения параметров внутренней круговой полости и прямолинейной трещины выходящей на поверхность упругого прямоугольника. Идентификация дефектов основана на минимизации функционалов невязки между данными о наборе первых четырех его резонансных частот.

Постановка обратной задачи. Рассмотрим установившиеся колебания с круговой частотой ω упругого тела, занимающего конечную односвязную область V с границей S. Граница области может быть описана объединением непересекающихся областей $S = S_1 \cup S_2 \cup S_3$, причем на S_1 заданы кинематические, а на S_2 — силовые граничные условия. Множество S_3 — это неизвестные границы дефекта (трещина, выходящая на поверхность, внутренняя полость), свободные от напряжений.

Амплитудные характеристики этих колебаний удовлетворяют системе дифференциальных уравнений линейной теории упругости [9]:

$$\sigma_{ij,j} = \rho\omega^2 u_i,\ \sigma_{ij} = c_{ijkl}u_{k,l}\ i = 1,2,3,\ \underline{x} \in V, \quad (1)$$

и граничным условиям прямой краевой задачи

$$u_i\,|_{S_1} = u_i^{(1)},\ t_i\,|_{S_2} = \sigma_{ij}m_j\,|_{S_2} = p_i,\ t_i\,|_{S_0} = 0, \quad (2)$$

где u_i, t_i — компоненты векторов смещений и напряжений; c_{ijkl} — компоненты тензора упругих постоянных; ρ — плотность.

В обратной задаче внутренние границы области S_3 являются неизвестными, информацией для их определения является набор собственных частот колебаний:

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, ..., \omega_n\}. \quad (3)$$

На практике наиболее точно определяются набор первых частот, вместе с этим информативность этих данных существенно зависит от вида и размера дефекта, что может быть выражено зависимостью $\omega_i = \omega_i(S_3)$, $i = 1,2,...,n$. Определение внутренней границы S_3 сводится к нахождению абсолютного (нулевого) максимума функционала, задающего умноженную на –1 норму (в некотором пространстве L) разности между измеренными резонансными (3) и найденными из решения краевой задачи (1)–(2) собственными частотами $\omega_i = \omega_i(\tilde{S}_3)$, $i = 1,2,...,n$, где $\tilde{S}_3$ — заданная конфигурация дефекта, при этом W — область изменения искомых параметров, характеризующих дефект $\tilde{S}_3$, определяется их физическим смыслом. В настоящей работе в качестве такого функционала используется выражение «взвешенной» нормы разности, при которой влияние на его значение изменения всех используемых частот в определенной степени одинаково:

$$F(\tilde{S}_3) = -\left[\sum_{i=1}^{n}\left[1-\frac{\omega_i\left(\tilde{S}_3\right)}{\omega_i\left(S_3\right)}\right]^2\right]^{1/2}, \quad \tilde{S}_3 \in W, \tag{4}$$

при этом область W изменения параметров, характеризующих область $\tilde{S}_3$, известна и определяется размерами исследуемого образца.

Описание программного обеспечения. Для решения обратных геометрических задач идентификации дефектов разработан и программно реализован комплекс Genetic Algorithm with Finite Element Method in Non-Destructive Testing (GAFEMNDT). Данный программный продукт является связующим звеном между модулем ГА «AI::Genetic::Pro» разработанного Strzelecki Lukasz [10] и конечно-элементном пакетом, причем в настоящей работе был использован FlexPDE. Результатом работы GAFEMNDT является набор параметров, обеспечивающий экстремум функции многих переменных.

Система написана на скриптовом языке программирования PERL [11]. Выбор в пользу скриптового языка был продиктован необходимостью оперативно менять целевую функцию, что является не тривиальной задачей для классических языков, таких как Delphi, C++ и т. д. GAFEMNDT представляет собой модульный PERL-скрипт. Целевая платформа для запуска приложения: Linux.

Входными данными для GAFEMNDT является файл, содержащий в себе описание целевого функционала и предельные значения варьируемых переменных.

Выходными данными модуля GAFEMNDT является текстовый файл, содержащий в себе таблицу с результатами расчета. Решением является строка с максимальным значением целевой функции. Простота представления выходных данных позволяет производить визуальный и статистический анализ практически в любом программном продукте, ориентированном на обработку табличных данных, начиная от офисных пакетов Microsoft Office и LibreOffice и заканчивая узкопрофильными пакетами обработки данных, таких как ParaView и VisIt.

Примеры решения задач неразрушающего контроля.

Ниже приведены результаты численных экспериментов по идентификации круговой полости и прямолинейной трещины, выходящей на поверхность прямоугольника под прямым углом. Идентификации подлежат дискретные параметры, характеризующие координаты центра и радиус окружности, или абсцисса точки выхода трещины на поверхность и ее длина. В качестве значений, характеризующих точность идентификации искомых параметров, рассматривались относительные ошибки e, которые вычислялись по формуле:

$$e = \frac{A-B}{A}, \tag{5}$$

где A — целевое значение искомого параметра; B — варьируемое расчетное значение этого параметра.

Первым шагом минимизации функционала (4) с помощью ГА является настройка его параметров. Проведенные численные эксперименты показали, что наиболее рациональными в смысле «точность — время» являются следующие параметры генетического алгоритма:

Таблица 1

Параметры генетического алгоритма

Параметр	Значение
Размер популяции	128
Разрядность генома	16 бит
Число поколений	<300
Вероятность кроссовера	0,95
Вероятность мутации	0,02
Число родителей	2
Выборка	Рулетка
Стратегия кроссовера	Точечная. 2 точки.
Использовать стратегию элитизма	Да

Идентификация полости в прямоугольном теле. Описанную методику проиллюстрируем на задачах идентификации внутренних полостей в прямоугольнике, совершающим собственные колебания в рамках задачи плоской деформации. Размеры прямоугольника: длина 0,02 м, ширина 0,01 м, материал — сталь, модуль Юнга $E = 20\times10^{10}\ H/м^2$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,29$. Правая сторона прямоугольника жестко закреплена, граница внутренней полости свободна от напряжений; X и Y — координаты центра; R — радиус окружности.

Решение обратной задачи идентификации кругового отверстия осуществляется на основе минимизации функционала (4). В качестве инструмента решения прямой задачи использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в пакете FlexPDE. Роль «измеренных» резонансных частот выполняет набор первых четырех собственных частот, рассчитанных при заданных параметрах дефекта.

В табл. 2 приведены результаты расчета с помощью GAFEMNDT для 10 примеров прямоугольников с отверстиями, которые были выбраны случайным образом.

Таблица 2

Поиск внутренней полости

№ п/п	Изображение	Параметр	Расчет	Цель	Ошибка, %
1		X	0,003739	0,003739	0,0012
		Y	0,002288	0,002288	0,0121
		R	0,001382	0,001382	0,0032
2		X	0,016465	0,016509	0,2678
		Y	0,001982	0,002027	2,1820
		R	0,000288	0,000287	0,1022
3		X	0,017356	0,017356	0,0005
		Y	0,000921	0,000921	0,0079
		R	0,000623	0,000623	0,0007
4		X	0,010452	0,010452	0,0006
		Y	0,001003	0,001003	0,0032
		R	0,001422	0,001422	0,0005
5		X	0,005504	0,005489	0,2733
		Y	0,000987	0,000999	1,2534
		R	0,000377	0,000376	0,4529
6		X	0,000994	0,000994	0,0017
		Y	0,014685	0,014685	0,0016
		R	-0,000559	-0,000559	0,0324
7		X	0,000675	0,000674	0,1095
		Y	0,010039	0,010043	0,0438
		R	0,000754	0,000751	0,3671
8		X	0,000263	0,000263	0,0043
		Y	0,004963	0,004963	0,0011
		R	0,002378	0,002378	0,0031
9		X	0,000146	0,000146	0,0050
		Y	0,016345	0,016345	0,0001
		R	-0,001924	-0,001924	0,0046
10		X	0,001662	0,001662	0,0011
		Y	0,011621	0,011621	0,0008
		R	-0,000262	-0,000262	0,0410

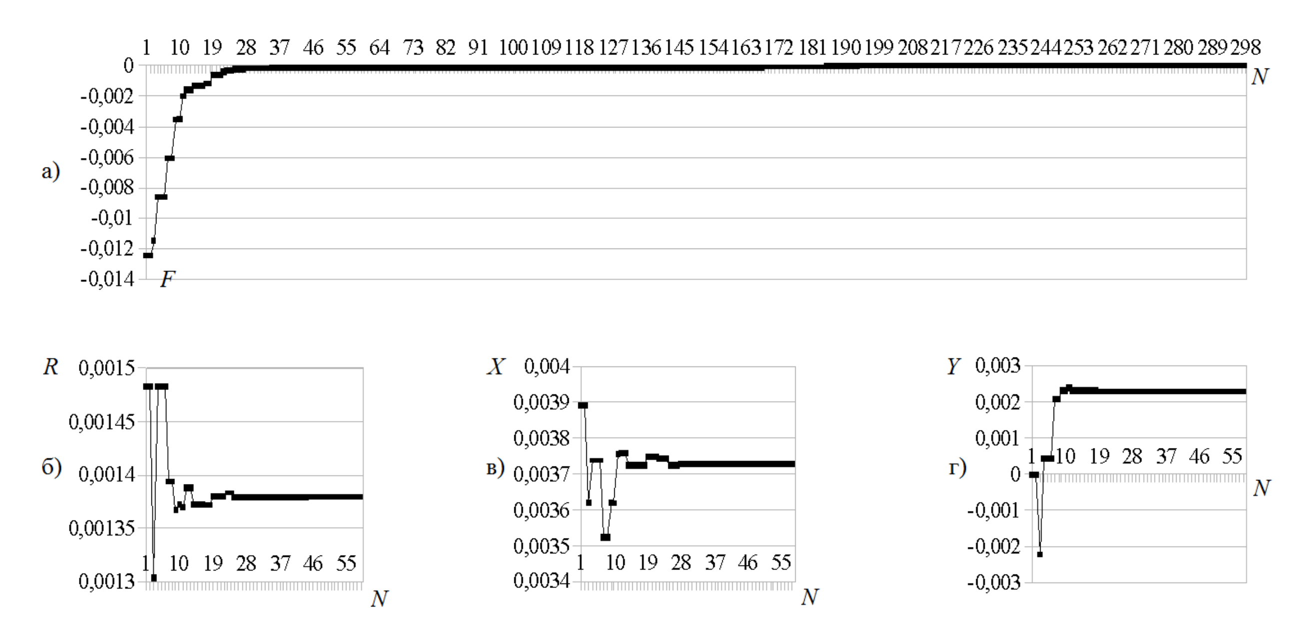


Рис.1. а) Целевая функция; б) R — радиус окружности; в) и г) X и Y — координаты центра окружности

На рис. 1, а представлены графики изменения целевого функционала F (4) и параметров R, X и Y. На рис. 1, б, в и г проиллюстрированы зависимости от N числа эпох ГА для задачи 1 из таблицы 2. Анализ этих результатов показывает, что приемлемая точность идентификации достигается уже при 40 эпохах.

Прямоугольное тело с трещиной, выходящей на поверхность. Вторым примером применения описанной выше методики является идентификация выходящей под прямым углом на поверхность прямолинейной трещины в прямоугольнике длиной 0,05 м, шириной 0,01 м, из того же, что и в п. 3.1, материала. Половина правой стороны прямоугольника закреплена, *X0* — координата, где трещина выходит на поверхность, *Y1* — глубина трещины (рис. 2).

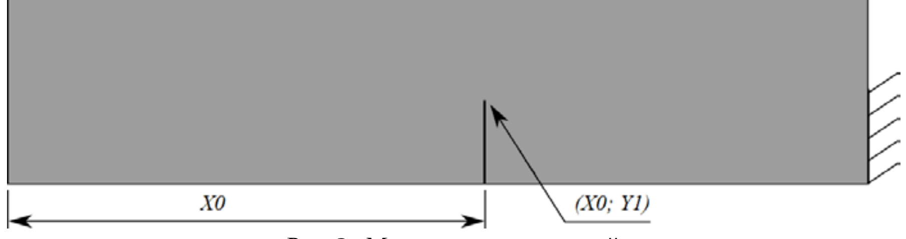


Рис. 2. Модель тела с трещиной

В качестве входных данных были использованы первые три собственные частоты колебаний контролируемого объекта. В табл. 3 представлены результаты идентификации 10 примеров трещин, выходящих на нижнюю сторону прямоугольника.

Таблица 3

Поиск трещины, выходящей на поверхность

№ п/п	Параметр	Расчет	Цель	Ошибка, %
1	*X0*	0,027813	0,027726	0,313126
	Y1	0,004534	0,004511	0,510042
2	*X0*	0,021536	0,020737	3,851143
	Y1	0,002861	0,002909	1,665110
3	*X0*	0,004740	0,004981	4,855177
	Y1	0,002855	0,002702	5,334544
4	*X0*	0,004938	0,004938	0,002417
	Y1	0,005032	0,005032	0,001143
5	*X0*	0,042694	0,042701	0,014959
	Y1	0,001943	0,001942	0,062128
6	*X0*	0,012682	0,012615	0,531135

	Y1	0,004883	0,004903	0,399785
7	*X0*	0,019912	0,019915	0,011219
	Y1	0,001901	0,001901	0,012122
8	*X0*	0,024881	0,024931	0,201769
	Y1	0,001259	0,001261	0,179161
9	*X0*	0,024716	0,024804	0,354866
	Y1	0,001853	0,001871	0,969296
10	*X0*	0,009450	0,009402	0,511221
	Y1	0,008899	0,008903	0,048833

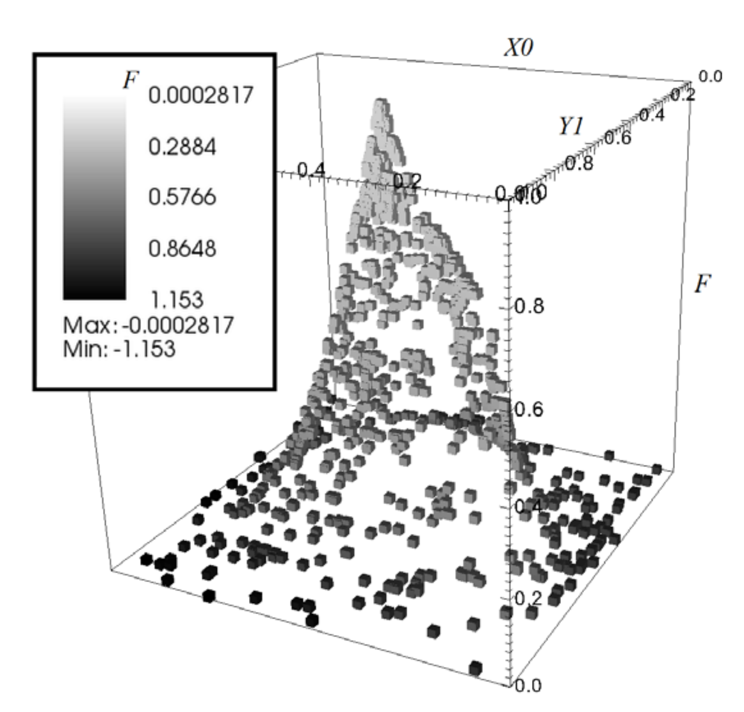


Рис. 3. Целевая поверхность

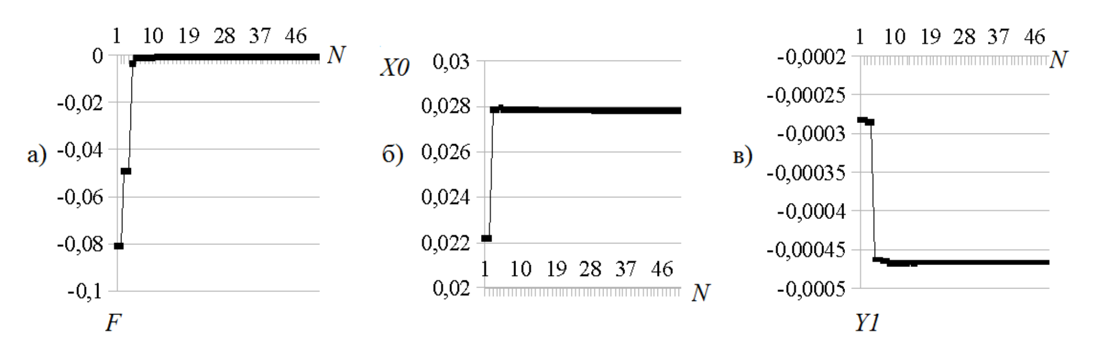


Рис. 4. а) Целевая функция; б) *X0* — координата, где трещина выходит на поверхность; в) *Y1* — глубина трещины

На рис. 3 представлен пример целевой поверхности функционала (4) (значения *X0*, *Y1*, *F* нормированы и изменяются в пределах [0;1]). На рис. 4 проиллюстрировано поведение целевой функции и параметров в зависимости от числа эпох *N* для 1-ой задачи из таблицы 3. Быстрая сходимость алгоритма (20 эпох) обясняется структурой целевой поверхности.

Выводы. Результаты исследования состоят в следующем:

- Определены рациональные параметры настройки ГА, представленные в табл. 1.
- Для определения трех параметров полости (п. 3.1) с достаточной степенью точности требуется не менее четырех собственных частот колебаний. При этом удовлетворительная точность идентификации достигается при 40

поколениях ГА.

- В задаче идентификации трещины (п. 3.2) достаточной информацией оказался набор первых трех резонансных частот, при этом целевая поверхность имеет один экстремум, для нахождения которого достаточно 20 поколений ГА.

Библиографический список

1. Курбатова, П. С. Об использовании нейронных сетей в задачах определения дефектов в упругих телах / П. С. Курбатова, Н. И. Сапрунов, А. Н. Соловьев // Современные проблемы механики сплошной среды : материалы X междунар. конф. — 2006. — С. 175–180.
2. Соловьев, А. Н. Идентификация и исследование критического состояния поперечной трещины в полосе с накладкой на основе искусственных нейронных сетей / А. Н. Соловьев, Б. В. Соболь, А. А. Краснощеков // Дефектоскопия. — 2014. — Т. 50, №. 8. — С. 23–35.
3. Соловьев, А. Н. Реконструкция дефекта на поверхности труб с помощью сочетания метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей / А. Н. Соловьев, З. Ч. Нгуен // Вестник ЮНЦ РАН. — 2014. — Т. 10, № 2. — С. 9–15.
4. Баранов, И. В. Об одном генетическом алгоритме и его применении в обратных задачах идентификации упругих сред / И. В. Баранов, А. О. Ватульян, А. Н. Соловьев // Вычислительные технологии. — 2006. — Т. 11, № 3. — С. 14–26.
5. Yongyong He. Using genetic algorithms and finite element methods to detect shaft crack for rotor-bearing system / Yongyong He, Dan Guo, Fulei Chu. // Mathematics and Computers in Simulation. — Vol. 57, 1–2. — P. 95–108.
6. Mohammad-Taghi Vakil-Baghmisheh. Crack detection in beam-like structures using genetic algorithms / Mohammad-Taghi Vakil-Baghmisheh, Mansour Peimani, Morteza Homayoun Sadeghi, Mir Mohammad Ettefagh // Applied Soft Computing. — Vol. 8, 2. — P. 1150–1160.
7. Fernando, S. Damage detection with genetic algorithms taking into account a crack contact model / Fernando S. Buezas, Marta B. Rosales, Carlos P. Filipich // Engineering Fracture Mechanics. — Vol. 78, 4. — P. 695–712.
8. Eleni N. Chatzi. Experimental application and enhancement of the XFEM–GA algorithm for the detection of flaws in structures. / Eleni N. Chatzi, Badri Hiriyur, Haim Waisman, Andrew W. Smyth // Computers & Structures. — Vol. 89, 7–8. — P. 556–570.
9. Новацкий, В. Теория упругости / В. Новацкий. — Москва : Мир, 1975. — 872 с.
10. Efficient genetic algorithms for professional purpose [Электронный ресурс] / CPAN. — Режим доступа : http : // search.cpan.org /~strzelec / AI-Genetic-Pro-0.4 / lib / AI / Genetic / Pro.pm / (дата обращения : 06.02.2016).
11. Learning Perl [Электронный ресурс] / The Perl Programming Language. — Режим доступа : http : // www.perl.org / (дата обращения : 06.02.2016).

References

1. Kurbatova, P. S., Saprunov, N.I., Solovyev, A.N. Ob ispol'zovanii neyronnykh setey v zadachakh opredeleniya defektov v uprugikh telakh. [On the use of neural networks in problems of determining defects in elastic bodies.] Sovremennye problemy mekhaniki sploshnoy sredy: materialy X mezhdunar. konf. [Current problems of continuum mechanics: Proc. X Int. Conf.] 2006, pp. 175–180 (in Russian).
2. Solovyev, A. N., Sobol, B.V., Krasnoshchekov, A.A. Identifikatsiya i issledovaniye kriticheskogo sostoyaniya poperechnoy treshchiny v polose s nakladkoy na osnove iskusstvennykh neyronnykh setey. [The Identification and Study of the Critical State of a Transverse Crack in a Zone with a Lap Based on Artificial Neural Networks.] Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014, vol. 50, no. 8, pp. 23–35 (in Russian).
3. Solovyev, A. N. Rekonstruktsiya defekta na poverkhnosti trub s pomoshch'yu sochetaniya metoda konechnykh elementov i iskusstvennykh neyronnykh setey. [Reconstructing defect on the surface of pipes using the finite element method and artificial neural network.] Vestnik SSC RAS, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 9–15 (in Russian).
4. Baranov, I. V., Vatulyan, A.O., Solovyev, A.N. Ob odnom geneticheskom algoritme i yego primenenii v obratnykh zadachakh identifikatsii uprugikh sred. [Genetic algorithm for solving the inverse identification problem for elastic media.] Computational Technologies, 2006, vol 11, no. 3, pp. 14–26 (in Russian).
5. Yongyong He, Dan Guo, Fulei Chu. Using genetic algorithms and finite element methods to detect shaft crack for rotor-bearing system. Mathematics and Computers in Simulation, vol. 57, no. 1–2, pp. 95–108.

6. Mohammad-Taghi Vakil-Baghmisheh, Mansour Peimani, Morteza Homayoun Sadeghi, Mir Mohammad Ettefagh. Crack detection in beam-like structures using genetic algorithms. Applied Soft Computing, vol. 8, no. 2, pp. 1150–1160.

7. Fernando, S. Buezas, Marta B. Rosales, Carlos P. Filipich. Damage detection with genetic algorithms taking into account a crack contact model. Engineering Fracture Mechanics, vol. 78, no. 4, pp. 695–712.

8. Chatzi, Eleni N., Hiriyur, Badri, Waisman, Haim,. Smyth ,Andrew W. Experimental application and enhancement of the XFEM–GA algorithm for the detection of flaws in structures. Computers & Structures, vol. 89, no. 7–8, pp. 556–570.

9. Novatskiy, V. Teoriya uprugosti. [Theory of elasticity.] Moscow: Mir, 1975, 872 p. (in Russian)

10. Efficient genetic algorithms for professional purpose. CPAN. Available at: http : // search.cpan.org /~strzelec / AI-Genetic-Pro-0.4 / lib / AI / Genetic / Pro.pm / (accessed: 06.02.2016).

11. Learning Perl. The Perl Programming Language. Available at: http :// www.perl.org / (accessed: 06.02.2016).

Поступила в редакцию 12.02.2016
Сдана в редакцию 19.02.2016
Запланирована в номер 23.03.2016